

MO 근접장 기록을 위한 광학 갭 센서

윤용중[†] · 박재혁^{*} · 박노철^{**} · 박영필^{***}
 (2003년 1월 16일 접수, 2004년 1월 29일 심사완료)

Optical Gap Sensor for Magneto-Optic Near-Field Recording

Yong-Joong Yoon, Jae-Hyuk Park, No-Cheol Park and Young-Pil Park

Key Words : Magneto Optical Recording(광자기 기록), Near-Field Recording(NFR : 근접장 기록), Polarized Light(편광된 빛), Optical Gap Sensor(광학식 간극 센서)

Abstract

This paper proposes a new method of measuring an air interface distance between a solid immersion lens (SIL) applied magneto-optic technology and the disk surface. For applying near-field recording (NFR) technology to the magneto-optic storage devices for the next generation, it is positively necessary to maintain the small air gap under about 100nm. We design an apparatus that consists of some optical components such as a prism, a polarizer and an analyzer. By using the Fresnel reflection coefficient equation, Jones matrices calculation and Malus's law, we establish a mathematical model for understanding the characteristics of the system. The simulations are based on the mathematical model and through the simulation results which is made with various cases we can estimate the performance of the new optical gap sensor system. Experimental results, which are also based on the mathematical model for specific cases, are in good agreement with simulated ones and demonstrate the possibility as the new optical gap sensor.

1. 서 론

광 저장 기기에서 기록 용량의 증가가 요구됨에 따라 많은 연구자와 기업에서는 광 저장 기기 부문에서 새로운 기술을 개발하고 있다. 대표적인 예로는 Magneto-Optic (MO), Magnetic Amplifying Magneto-Optical System (MAMMOS), Holographic Recording 그리고 NFR 기술 등을 들 수 있다. 이와 같은 기술에서 차세대 정보저장 기술로 각광을 받고 있는 것은 근접장 기록을 이용하여 정보용량을 증대하는 것이다. 여기에 더하여 최근에는 MO 기술을 근접장에 접목하여 고용량을 추구하려는

노력이 진행되고 있다. 근접장 기술을 실현하기 위해서 필요한 핵심 기술은 SIL 과 미디어 사이의 거리를 100nm 정도로 유지하는 것이다. 이에 대한 대표적인 연구는 Ichimura 가 정전 용량을 이용한 거리 측정 기술과 Imanishi 의 내부 전반사를 이용한 기술이 있다.^(1,2) 본 연구는 기록 용량 증대를 위해 근접장 기술에 MO 기술을 접목하기 위해서 갭 측정을 위한 센서를 개발하고자 하는 것이다.

이 연구에서는 새로운 형태의 광학 갭 센서를 개발하기 위해 P 파와 S 파의 편광 빔과 그것의 광량의 차이를 이용하였다. 편광 빔의 광량은 거리의 함수로 그 크기를 측정하여 미세한 거리의 양을 측정할 수가 있다. 이 광학 갭 센서에서는 입사각 ϕ_1 과 파장 λ 를 설계자가 선택하여 측정 범위를 조절할 수 있다는 점과 세 점을 측정하면 SIL 이나 미디어의 경사각도를 측정할 수 있다는 장점이 있다.

이 논문에서는 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 이 새로운 형태의 광학 갭센서를 MO 근접장 기술에 적용할 수 있음을 평가 하였다.

[†] 책임저자, 회원, 연세대학교 대학원 정보저장협동과정

^{*} 연세대학교 대학원 기계공학과

^{**} 회원, 연세대학교 정보저장협동과정

E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4530 FAX : (02)365-8460

^{***} 회원, 연세대학교 기계공학과

2. 수학 모델

새로운 개념의 광학 검 센서에 적용된 이론은 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 Fresnel 반사계수(Fresnel Reflectance Coefficients)이고 두 번째는 Jones 행렬계산(Jones Matrices Calculation), 마지막으로 적용된 이론은 Malus 법칙(Malus's law)이다. 위의 이론을 바탕으로 수학적 모델을 만들었으며 시뮬레이션을 통해 시스템의 특성을 파악할 수 있다. Fig. 1 은 전체 시스템의 개략도이다.

2.1 Fresnel 반사계수

일반적으로 빛은 하나의 매질에서 다른 매질로 통과할 때, 그 일부는 통과하고 나머지는 반사를 하게 된다. Fig. 2 는 센서의 일부분인 프리즘과 공기층 그리고 매질 사이에서의 빛의 반사와 투과를 개략적으로 보여주고 있다.

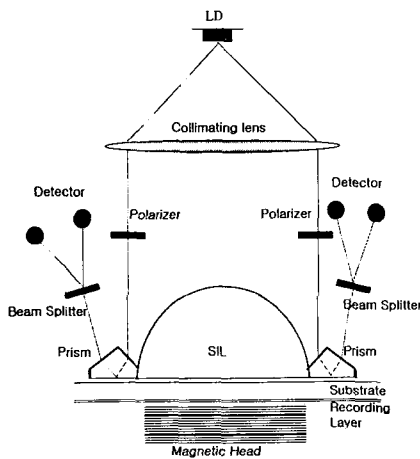


Fig. 1 Schematic diagram of optical pick-up applied optical gap sensor

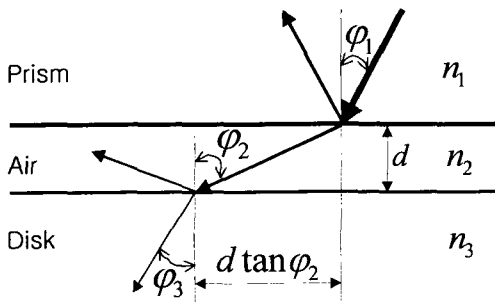


Fig. 2 Schematic diagram of reflected and transmitted light at the prism, air and disk

Fresnel 반사계수 γ 는 단면에서 입사광에 대한 반사된 빛의 양의 비율을 나타낸다.⁽³⁾ 이 계수는 경계매질의 밀도에 따라 두 가지 형태로 구분이 되며, 다음과 같이 수학적으로 표현할 수 있다.

$$r_{12}^p = \frac{\tan(\varphi_1 - \varphi_2)}{\tan(\varphi_1 + \varphi_2)} \tag{1}$$

$$r_{12}^s = -\frac{\sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} \tag{2}$$

$$r_{23}^p = \frac{n_3 \cos \varphi_2 - n_2 \cos \varphi_3}{n_3 \cos \varphi_2 + n_2 \cos \varphi_3} \tag{3}$$

$$r_{23}^s = \frac{n_2 \cos \varphi_2 - n_3 \cos \varphi_3}{n_2 \cos \varphi_2 + n_3 \cos \varphi_3} \tag{4}$$

여기서, $\varphi_2 = \sin^{-1}(\frac{n_1}{n_2} \sin \varphi_1)$, $\varphi_3 = \sin^{-1}(\frac{n_2}{n_3} \sin \varphi_2)$

로 표현이 되며 아래 첨자는 각 매질을 지시하고, 위 첨자는 P 파와 S 파를 의미한다. 이것을 바탕으로 Azzam 과 Heavens 는 여러 층에서의 Fresnel 전 반사계수(Fresnel Total Reflectance Coefficients)를 유도했다.^(4,5)

$$R^p = \frac{r_{12}^p + r_{23}^p e^{-j2\beta}}{1 + r_{12}^p r_{23}^p e^{-j2\beta}}, \quad R^s = \frac{r_{12}^s + r_{23}^s e^{-j2\beta}}{1 + r_{12}^s r_{23}^s e^{-j2\beta}} \tag{5}$$

여기서, $\beta = 2\pi(\frac{d}{\lambda})n_2 \cos \varphi_2$ 이다.

위의 식에서 알 수 있듯이 Fresnel 전반사계수는 공기 층 간격 d 의 함수로 이것을 측정할 수 있다면 미세한 간격을 측정할 수 있는 것이다.

2.2 Jones 행렬계산과 Malus 법칙

Fresnel 전반사계수를 물리적으로 측정하기 위해서는 빛의 상태를 정의해야 한다. 이를 위해 편광기를 이용하여 자연 상태의 빛을 편광 빛으로 만들었다. 이것을 수학적으로 표현하기 위해 Jones 행렬을 이용하였으며,⁽⁶⁾ 이 이론을 적용하여 본 시스템을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} E_{Dp} \\ E_{Ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A & \sin A \cos A \\ \sin A \cos A & \sin^2 A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P & \sin P \cos P \\ \sin P & \sin^2 P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{bmatrix} \tag{6}$$

여기서, 각각의 행렬은 광학 부품 (편광기, 프리즘, 분광기)을 통과한 후의 빛의 상태를 나타내고 P 는 편광각을, A 는 분광각을 나타낸다. 식

(6)에서 좌측 항, 즉 $[E_{DP} \ E_{DS}]^T$, 은 빛의 P 파와 S 파의 전기장으로 검출기에서의 빛의 상태를 나타내는데 이것을 물리적으로 측정한다면 미세 거리를 측정할 수 있다. 이것을 정량적으로 측정하기 위해 Malus 법칙을 시스템에 적용하였다.⁽⁷⁾ 초기 빛의 상태를 수평 선편광된 빛 즉 $(E_{0P} \ E_{0S})^T = (1 \ 0)^T$ 로 가정하고 Malus 법칙을 적용하면 검출기에서의 광량은 다음과 같다.

$$I_{DP} = E_{DP} \cdot E_{DP}^* \quad (7)$$

$$I_{DS} = E_{DS} \cdot E_{DS}^* \quad (8)$$

여기서 E_{DP}^*, E_{DS}^* 는 각각 E_{DP}, E_{DS} 의 복소 공액이다. 위의 식을 정리하면 최종적으로 광학 갭 센서의 수학적 모델을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$I_{DP} = \frac{1}{2}(H_1 + H_2 + H_3) \cos^2 P \cos^2 A \quad (9)$$

$$I_{DS} = \frac{1}{2}(H_1 + H_2 + H_3) \cos^2 P \sin^2 A \quad (10)$$

여기서 $H_1 = |R_p|^2 \cos^2 P + |R_s|^2 \sin^2 P$,

$$H_2 = (|R_p|^2 \cos^2 P - |R_s|^2 \sin^2 P) \cos 2A,$$

$$H_3 = 2 \operatorname{Re}(R_p R_s^*) \sin P \cos P \sin 2A \text{ 이다.}$$

식 (9)과 (10)은 검출기에서의 광의 세기를 나타낸다. 따라서 R^P, R^S 가 거리 d 의 함수이므로 물리적으로 광의 세기를 측정하여 SIL 과 미디어 사이의 거리를 측정할 수가 있다.

3. 시뮬레이션

시뮬레이션은 위에서 설정된 수학적 모델을 바탕으로 하였으며 이를 통하여 시스템 전체의 특성을 파악할 수 있다. 시뮬레이션은 설계자가 설계 변수로 설정한 것을 변화시켜가면서 시행하였다. 이 시스템에서 중요 설계변수로 택할 수 있는 것은 편광각 P, 분광각 A, 입사각 φ_1 그리고 파장 λ 이다. Fig.3~6 은 각각의 설계변수의 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 이 때 프리즘,

공기, 디스크의 굴절률은 각각 1.8105, 1.0009, 1.8105 이다. Fig. 3 에서 입사각은 33° , 파장은 650nm, 분광각은 5° , Fig. 4 는 위와 같은 조건에 편광각을 0° , Fig. 5 는 편광각과 분광각을 각각 $0^\circ, 5^\circ$, Fig. 6 에서는 입사각, 편광각, 분광각을 각각 $33^\circ, 0^\circ, 5^\circ$ 로 하였다.

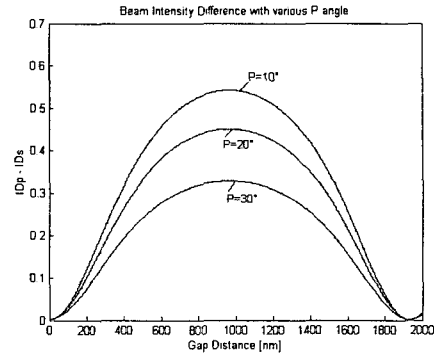


Fig. 3 Simulation result with various polarizer angle

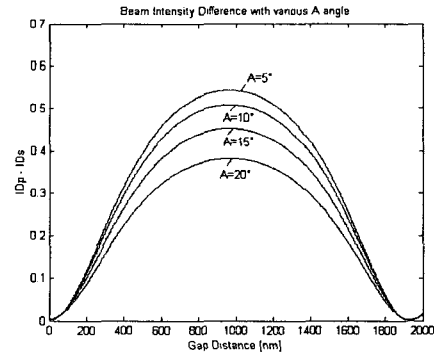


Fig. 4 Simulation result with various analyzer angle

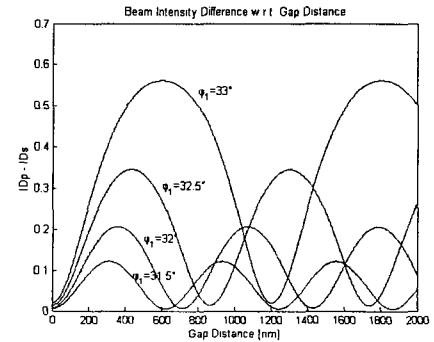


Fig. 5 Simulation result with various incident angle

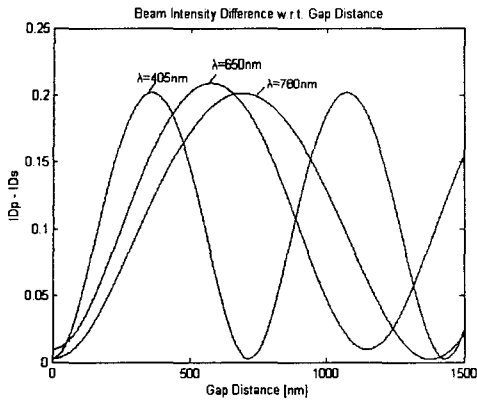


Fig. 6 Simulation result with various wavelength

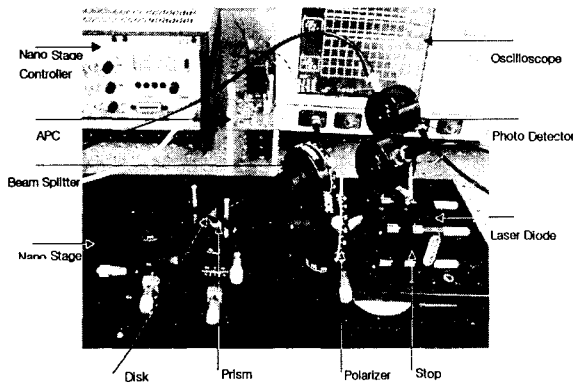


Fig. 7 Experimental setup

위의 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 설계 변수에 따라 시스템의 특성이 결정된다. 우선 편광기와 분광기각은 광량의 주기에는 영향을 미치지 못하고 그 크기에만 영향을 미치고 있음을 볼 수 있다. 따라서 실험과 실제 시스템을 설계할 때는 각각의 각을 가능하면 작게 하는 것이 유리하다. 또한 입사각의 변화에 따라서는 주기와 광량에 다 영향을 미치며 가능하면 입사각을 크게 하는 것이 유리하다. 하지만 특정 각 이상이 되면 전반사각이 되어 새로운 이론을 적용해야 한다. 따라서 본 논문에서 실험은 입사각이 33°를 넘지 않는 범위에서 실행했다. 파장에 대한 결과는 광량의 세기에는 영향이 없고 주기에 영향을 미치고 있다. 현재는 광 저장 기기에서 기록 밀도를 증가하기 위해 청색 레이저의 사용이 연구되고 있다. 이 시뮬레이션의 결과를 통해 보면 청색 레이저를 사용해도 근접장에 응용할 수 있을 만큼의 측정범위는 확보가 가능하다.

4. 실험

Fig. 7은 실험 장비를 보여주고 있으며, 개략도

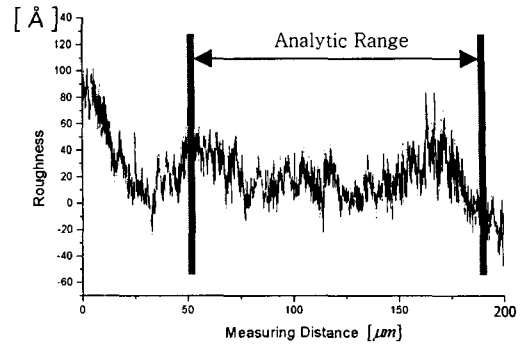


Fig. 8 Prism surface roughness

Table 1 Analytic result of prism surface roughness

Analytic Range	Results (Å)
Ra Arithmetical mean deviation of the profile	13
Rp Maximum height of hill	69
Rv Maximum height of valley	-44

에서 보여주는 것처럼 편광기(Glan-Thompson Prism Polarizer), 프리즘(주문 제작), 분광기(Wollaston Prism Polarizer) 등과 같은 광학 부품과 수 nm의 구동을 위해 나노 구동기와 그것의 제어기(Multi-Axis Piezo Flexure Nano Positioner and Scanner)로 구성되어 있다. 이 실험에서 광원은 상용 픽업에 사용되는 파장 650nm 용의 것을 사용했으며 실험상 중요한 설계 요소인 프리즘의 표면 조도는 다음과 같다.

위의 실험 장비를 이용하여 입사각 ϕ_1 은 32.9°, 분광기각 A는 5°, 그리고 파장 λ 는 650nm를 사용하고 편광기각 P를 변화시켜가면서 실험하여 그 결과를 Fig. 9와 10에 나타내었다. 또한 편광기각은 0°로 하고 분광기각을 변화 시켜가면서 실험하여 그 결과를 Fig. 11과 12에 나타내었다. Fig. 9-12에서 1000nm 이상의 원거리뿐만 아니라 근접장에 적용할 수 있는 100nm 이하의 미세 영역에서의 실험결과가 시뮬레이션과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 또한 분광기 및 편광기각이 작은 경우가 큰 경우보다 전 영역에 걸쳐 실험결과와 시뮬레이션이 더욱 잘 일치하는 것을 확인할 수 있고, 특히 근접장 영역에서의 측정 감도가 우수함을 볼 수 있다.

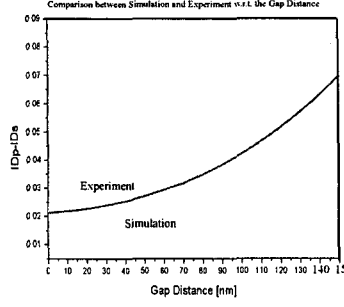
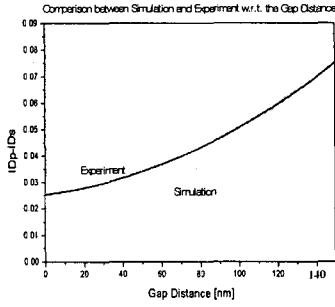
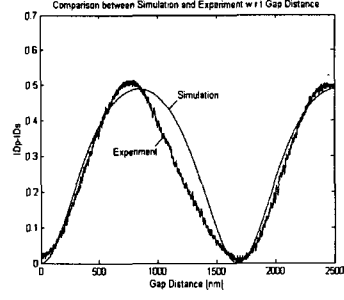
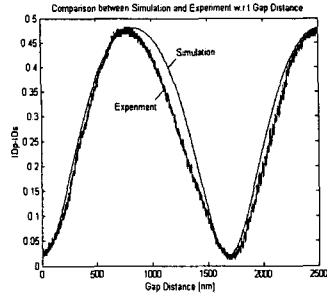


Fig. 9 Comparison between the Experimental and simulation result at $P=10^\circ$

Fig. 11 Comparison between the Experimental and simulation result at $A=5^\circ$

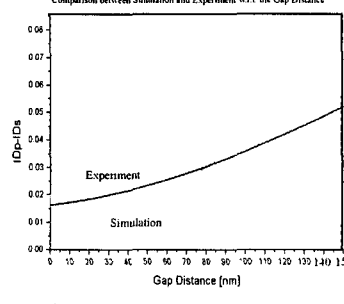
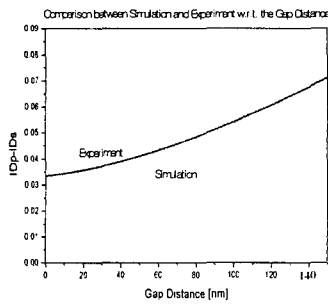
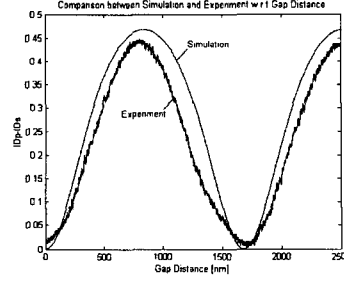
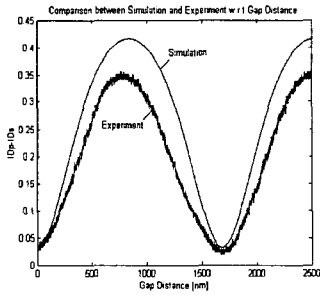


Fig. 10 Comparison between the Experimental and simulation result at $P=20^\circ$

Fig. 12 Comparison between the Experimental and simulation result at $A=10^\circ$

Fig. 9~12 에서 근접장 영역을 확대하여 나타낸 하단 그림에서 볼 수 있는, 실험과 시뮬레이션 결과의 차이는 실험시, 디스크와 프리즘 사이의 경사 또는 프리즘과 디스크의 가공에 따른 면의 오차에서 기인한 것으로 판단되며, 이들 오차는 실제 적용시, 보다 정밀한 장치구성에 의해 개선될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 측정범위를 근접장 영역으로 국한하여 실험결과를 시뮬레이션에 피팅(fitting)할 경우 매우 근사한 측정값을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 이들 실험 결과를 통하여 새로운 개념의 광학 캡 센서를 NFR 기술에 적용할 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서 기록용량의 증대를 위한 차세대 기술인 NFR 을 실현시키기 위해 중요한 요소인 캡을 측정하는 새로운 방법을 제시하였다. 여러 가지 광학 이론을 적용하여 수학적 모델을 완성했으며 이를 바탕으로 시뮬레이션을 통해 시스템 전반의 특성을 파악할 수 있었다. 실험을 통해 시뮬레이션 결과와 비교적 잘 일치함을 보였다. 이 캡 센서의 가장 큰 특징의 하나는 입사각과 파장에 따라 100nm 정도의 근접장 뿐만 아니라 1000nm의 원거리 측정도 가능하다는 것이다. 그러나 근접장 영역에서 실험장치의 기계적원인 등에 의해 15 ~ 25% 내외의 측정오차를 보였다. 이들 오차는 실제 적용시, 보다 정밀한 장치구성에 의해 개선될 수 있고, 더욱이 측정범위를 근접장 영역으로 국한하여 실험결과를 시뮬레이션에 피팅할 경우

매우 근사한 측정값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 지금까지 NFR 을 위해 연구된 캡 센서의 방법과 큰 차이를 보이는 것은 세 점 이상을 측정하여 디스크나 SIL 의 경사진 양을 측정할 수 있다는 것이다. 또한 이 시스템은 면의 굴곡 정도를 비접촉식으로 측정이 가능하다.

후 기

이 논문은 2001 년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2002-003-E00113)

참고문헌

- (1) Ichimura, I., Osato, K., Maeda, F., Owa, H. and H. Ooki, 1995, "High Density Optical Disk System Using a Solid Immersion Lens," *SPIE*, 2514, pp. 176~181.
- (2) Imanishi, S. and Ishimoto, T., 2000, "Near-Field Optical Recording of 1.36 Numerical Aperture," *Jpn.J.Appl.Phys.*, 39, pp. 962~967.
- (3) Harland G. Tompkins, 1993, *A User's Guide to Ellipsometry*, (Academic Press).
- (4) Azzam, R.M.A. and Bashara, N.M., 1977, *Ellipsometry and Polarized Light* (Holland Publishing Co.).
- (5) Heavens, O.S., 1965, *Optical Properties of Thin Solid Films* (Dover Publications).
- (6) Edward Collett, 1992, *Polarized Light Fundamentals and Applications* (Marcel Dekker).
- (7) Eugene Hecht, 2002, *Optics 4th-ed.* (Addison Wesley Longman).